

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE TRANSCETORES DE RF COM DIVERSIDADE DE ANTENAS EM UMA REDE WIRELESSHART

SANDRO ROBERTO ARAÚJO*, CHRISTIAN ALAN KRÖTZ*, CARLOS EDUARDO PEREIRA*, ALVARO AUGUSTO ALMEIDA DE SALLES*, JOÃO CESAR NETTO†, IVAN MÜLLER*

*UFRGS - Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica
Av. Osvaldo Aranha, 103 - Centro Histórico
Porto Alegre, RS, Brasil

†UFRGS - Instituto de Informática
Avenida Bento Gonçalves, 9500 - Agronomia
Porto Alegre, RS, Brasil

Emails: sandro.araujo1312@gmail.com, christianalank@gmail.com, cpereira@ece.ufrgs.br, aasalles@ufrgs.br, netto@inf.ufrgs.br, ivan.muller@ufrgs.br

Abstract— This article concentrates on the increase of error-rate robustness in industrial wireless sensor networks (IWSN). In order to achieve this objective, it is necessary to somehow circumvent and combat the intrinsic problems of wireless communication, which are: environmental noise, interference and multipath fading. Multipath fading can be considered as the main factor that makes communications in wireless sensor networks (WSNs) a real challenge when compared to other types of media, such as fiber transmission, cable or even point-to-point radio transmissions. In this sense, it is proposed the diversity of antennas as a solution to combat these effects, with the aim of improving the reliability of the radio link to allow the use of dense WSNs. The potential of antenna diversity in WirelessHART is not fully exploited in industrial applications. Thus, the focus of this article is the application of antenna diversity in WirelessHART networks aiming at the reduction of PER. The results are analyzed for two types of data links, that is, with and without diversity of reception space.

Keywords— Antenna Diversity, wireless sensor networks, multi-path fading, PER (Packet Error Rate), LQI (Link Quality Indicator)

Resumo— Este artigo concentra-se no aumento da robustez à taxa de erros em redes de sensores sem fio industriais (RSSFI). Para alcançar tal objetivo, é preciso, de algum modo, contornar e combater os problemas intrínsecos à comunicação sem fio, que são: o ruído ambiental, interferências e desvanecimento por multipercurso. O multipercurso pode ser considerado como o principal fator que torna as comunicações nas redes de sensores sem fio (RSSF) um verdadeiro desafio quando comparado com outros tipos de meios, como a transmissão em fibra, cabo ou mesmo transmissões via rádio. Nesse sentido, propõe-se a diversidade de antenas como uma solução para combater estes efeitos, com o objetivo de melhorar a confiabilidade do enlace de rádio para permitir o emprego de RSSF densas. O potencial da diversidade de antenas em redes *WirelessHART* não é totalmente explorado em aplicações industriais. Deste modo, o objeto de estudo é a aplicação da diversidade de antena em redes *WirelessHART*, objetivando a redução do PER. Os resultados são analisados para dois tipos de links de dados, isto é, com e sem diversidade de espaço na recepção.

Palavras-chave— Diversidade de antenas, redes de sensores sem fio, desvanecimento por multipercurso, PER (*Packet Error Rate*), LQI (*Link Quality Indicator*).

1 Introdução

Nos sistemas de comunicação sem fio tradicionais, são normalmente utilizadas uma antena para transmissão e uma antena para recepção, e exploram-se os domínios do tempo, frequência e codificação. Contudo, estes sistemas de transmissão são extremamente vulneráveis aos efeitos causados pelo ruído ambiental, interferências e o desvanecimento multipercurso, refletindo-se numa deterioração do sinal recebido, ou seja, verifica-se um aumento do PER (*Packet Error Rate*) e uma redução da SNR (*Signal-to-Noise Ratio*), traduzindo-se, conseqüentemente, numa redução da taxa de transmissão (Rappaport, 1996). A busca por um menor PER associada a melhorias na confiabilidade do sistema de telecomunicações tem motivado o uso de avançadas técnicas de transmissão e recepção de dados digitais. Entre estas técnicas, ganha espaço o estudo da utili-

zação de múltiplas antenas, tanto na transmissão quanto na recepção. Nesse contexto, enfatiza-se o estudo referente à "diversidade de antenas" a fim de alcançar esse objetivo.

1.1 Aplicação da Diversidade de Antena

Este artigo aplica a diversidade espacial de antenas em RSSFI com PHY padrão IEEE 802.15.4 com o emprego da "combinação de seleção" como técnica de diversidade espacial de antenas na recepção em RSSFI que, através de um algoritmo agregado à pilha do protocolo, seleciona a porta do receptor que apresente o maior LQI (Haykin, 2008), conforme o sinal recebido e realiza a comutação das antenas em transceptores de rádio. O algoritmo de diversidade de antenas fornece uma melhora significativa no desempenho do sistema de comunicação quando o ambiente operacional é dinâmico em termos de in-

tensidade do sinal e condições de desvanecimento. Desta forma, obtém-se ganho de diversidade e consequentemente um aumento da robustez e redução do PER, melhorando a qualidade do enlace de rádio.

2 Transceptor de RF

O dispositivo, que pode ser visto na Figura 1, utiliza o SoC MC1322x que está de acordo com o padrão da IEEE 802.15.4. Ele possui um processador ARM7 de 32bits e um transceptor de rádio de baixo consumo que opera na banda de 2,4GHz. O transceptor suporta transmissão, recepção, CCA, detecção de energia e medição do LQI, conforme requerido pela norma 802.15.4. A alimentação do transceptor é realizada através de uma bateria de Li-ion de 3,7V que pode ser recarregada através de uma porta USB. O transceptor possui uma memória flash de 32Mbits (Freescale, 2012). A placa do transceptor de RF possui um LNA-PA (*Low Noise Amplifier* e *Power Amplifier*) para aumentar a sensibilidade do receptor em 10 dB e a potência de saída para até 20 dBm (embora o protocolo *WirelessHART* defina a potência de saída em pelo menos 10 dBm, a norma IEEE 802.15.4 permite até 20 dBm). Também é utilizado um RTC TCXO (*Real-time clock temperature compensated crystal oscillator*) para que as restrições temporais do TDMA sejam atendidas, uma vez que o protocolo *WirelessHART* exige um RTC com incerteza máxima de 10 ppm para que não ocorra a perda de sincronização. O *hardware* do transceptor de RF possui ainda uma chave que seleciona a antena que irá transmitir ou receber o sinal de RF.

O Transceptor de RF é o dispositivo presente, geralmente, em maior número em uma rede *WirelessHART*. Esse é o componente distribuído pelo ambiente industrial. Os Transceptores de RF são responsáveis por realizar a publicação de suas variáveis de processo e a transmissão de pacotes entre dois pontos distintos na rede.

3 *WirelessHART* (WH)

O padrão WH é o primeiro padrão aberto de comunicação para medidas e controle em processos industriais, nasceu da necessidade de manter um padrão já consolidado na indústria (o HART) e da necessidade de usar tecnologia *wireless* para reduzir custos de medição, acesso de informações e acompanhamento dos equipamentos (Winter et al., 2011). A tecnologia WH apresenta uma rede segura que opera na banda de rádio de 2,4 GHz, utiliza a Norma IEEE 802.15.4 (Lorençato et al., 2013). A rede WH suporta uma ampla variedade de dispositivos de diversos fabricantes, é uma rede do tipo malha entre os dispositivos de campo. O protocolo de comunicação WH é precisamente programado uti-



Figura 1: Modelo do transceptor utilizado nos experimentos.

lizando TDMA. Sendo possível verificar a relação dos componentes dentro da comunicação WH na Figura 2.

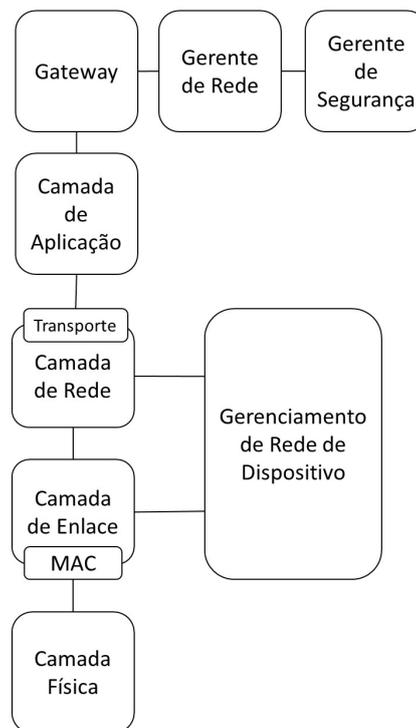


Figura 2: Pilha de Comunicação *WirelessHART*.

Este trabalho faz uso de uma ferramenta de análise de desempenho para verificar a eficiência da diversidade de antenas em transceptores de RF com PHY IEEE 802.15.4 em uma RSSFI como descrito no capítulo anterior. A ferramenta utilizada é baseada no protocolo UDP (Hart, 2010) para realizar a comunicação com o Gateway *WirelessHART*. O Gateway por sua vez comunica-se com os demais dispositivos na rede, conforme a Figura 3.

A aplicação para monitoração e controle dos

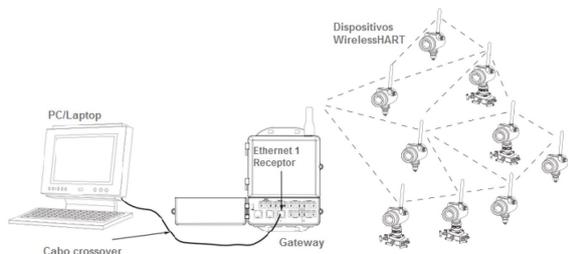


Figura 3: Ilustração da Conexão entre o PC e o Gateway, Gateway e os Dispositivos de Campo.

dispositivos WH é baseada no protocolo HART sobre UDP, tendo o formato geral do *frame* HART sobre UDP ilustrado na Figura 4.

Versão	tipo	msgID	Status	seq. H	seq. L	tam. H	tam. L	payload
--------	------	-------	--------	--------	--------	--------	--------	---------

Figura 4: Frame UDP.

A versão do protocolo utilizado na ferramenta é a versão 0x01. O Tipo identifica a direção, se é requisição ou resposta. O MsgID, indica se é um procedimento de estabelecimento de conexão ou troca de dados com o servidor. O Status, indica o estado da comunicação. A sequência parte alta e baixa, permite ao cliente da requisição realizar a associação da resposta com a requisição solicitada. O Tamanho parte alta e baixa, é o comprimento total do datagrama, sendo o comprimento da mensagem iniciado a partir do *byte* da versão até o último *byte* do *payload*. O *Payload*, é o campo de dados da mensagem referente ao tipo da mensagem. A Figura 5 ilustra um diagrama de comunicação HART sobre UDP.

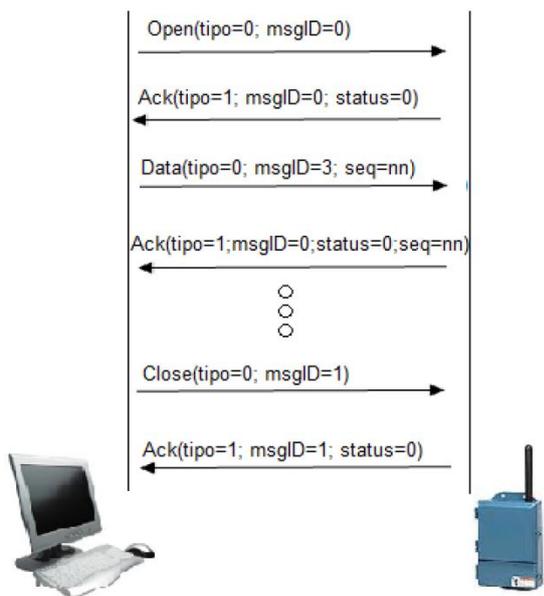


Figura 5: Diagrama de Comunicação HART sobre UDP.

A ferramenta "Software para Análise de Dispositivos WH" desenvolvido por (Winter et al., 2011) utiliza o ambiente de desenvolvimento integrado da Microsoft Visual Studio, que suporta as linguagens de programação C, C++ e C#, dentre estas a aplicação foi desenvolvida com a linguagem de programação C. Este *software* é capaz de obter informações relacionadas ao comportamento da rede WH e aos status dos dispositivos. Isto inclui, por exemplo, a análise dos dispositivos que estão na rede, topologia da rede, *links* entre os dispositivos, qualidade do sinal, pacotes transmitidos e pacotes perdidos, informações que de outra maneira teríamos que procurar através de meios mais descentralizados. O *software* é executado em um computador, que deve estar na mesma rede IP (*Internet Protocol* - Protocolo de Internet) do *gateway*, e que utiliza o protocolo HART-sobre-UDP para se comunicar com o gerenciador de rede WH. A aplicação é baseada em comandos HART, que são utilizados para obter os dados desejados a respeito da rede. Os comandos são encapsulados no padrão UDP e enviados, através do *gateway*, aos dispositivos de campo, que respondem as requisições (Machado and Pereira, 2014). Deste modo, o software identifica os dispositivos conectados na rede WH e envia uma requisição periódica de dados. Neste experimento, foi utilizada a requisição do comando 780 (Hart, 2009).

4 Análise de desempenho do transceptor de RF sem e com diversidade de antena

A Figura 6 apresenta o cenário de teste utilizado para o estudo de caso dos transceptores de RF com e sem diversidade de antena, onde foi implementada uma rede WH composta por quatro transceptores de RF sem diversidade e dois com diversidade de antena, o 1008 DIV ANT e o 1016 DIV ANT, formando uma rede com 6 nodos além do *gateway*.

Segue abaixo os parâmetros utilizados no cenário de estudo:

- Os dispositivos foram distribuídos em uma área com um raio de aproximadamente 6 metros;
- O tempo de duração das coletas de dados foram de aproximadamente 24 horas;
- A potência de transmissão dos transceptores foi ajustada para 10 dBm;
- O tempo de publicação da variável de processo associada aos dispositivos de campo foi ajustado para 60 segundos;
- O mecanismo de CCA da rede WH manteve-se na configuração padrão, ou seja, não habilitado.

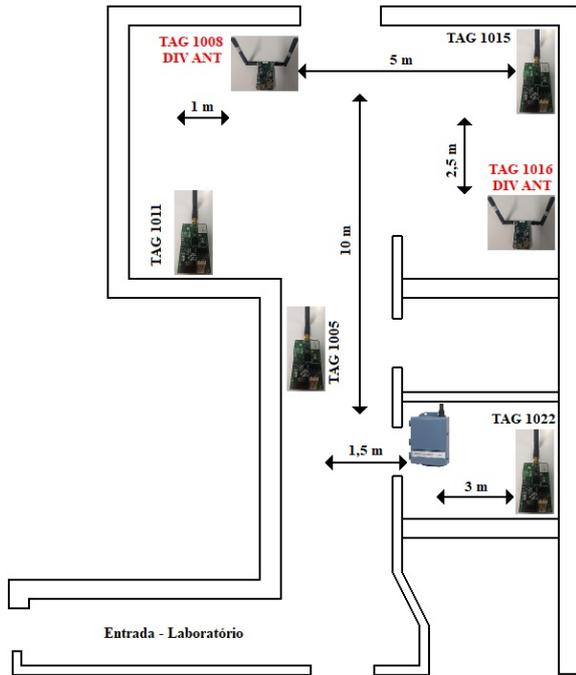


Figura 6: Localização dos transceptores no cenário de teste.

A rede foi implementada através do *Smart Wireless Gateway* (Emerson, 2013) e a rede formada para análise dos dados coletados, pode ser visto na Figura 7.

Primeiramente, observou-se nos dois transceptores de RF com o algoritmo de diversidade de antena, a comunicação em rede, a formação de vizinhos com outros elementos da rede (Rádio Id) e a recepção de pacotes de dados.

HART Tag	Node state	Active neighbors	Neighbors
TAG 1005	●	wihartgw TAG 1011 TAG 1015	3
TAG 1008 DIV ANT	●	TAG 1015 TAG 1016 DIV ANT	2
TAG 1011	●	wihartgw TAG 1022 TAG 1005	3
TAG 1015	●	wihartgw TAG 1008 DIV ANT TAG 1005	3
TAG 1016 DIV ANT	●	wihartgw TAG 1022 TAG 1008 DIV ANT	3
TAG 1022	●	wihartgw TAG 1016 DIV ANT TAG 1011	3

Figura 7: Topologia da rede WH.

Através deste comando foram coletados periodicamente os seguintes dados:

- Nickname: Número de dispositivos vizinhos (dispositivos com conexão com o dispositivo alvo);
- nTX: Número de pacotes de dados transmitidos para cada dispositivo vizinho;
- nRX: Número de pacotes recebidos de cada dispositivo vizinho;
- nTXfault: Número de pacotes que falharam, foram transmitidos e não receberam confirmação de recebimento;
- RSL: Intensidade de sinal entre cada dispositivo vizinho.

Os dados obtidos são apresentados na interface do software, vide Figura 8, e ainda registrados em uma planilha do Excel para posterior análise, vide Figura 9. Para fins de análise, devido a necessidade do experimento, foi adicionado no *software* de análise de desempenho o registro do parâmetro nTXfault na planilha do Excel. Pois sem o registro deste parâmetro, não haveria como coletar as informações para o experimento.

```

C:\Windows\system32\cmd.exe - hardi.exe
*****SOFTWARE PARA ANÁLISE DE DISPOSITIVOS WIRELESSHART*****
Conectando com 192.168.0.16... >>>> conectadot!!

MENU:
E: Enumerar Dispositivos
I: Informação dos Vizinhos
S: Estatística dos Dispositivos
A: Análise da Rede
q: quit (Pressione 'q' e aguarde a finalização!)

Verificando dispositivos na rede... ok

Numero de nos: 3
Endereco dos nos:
26587a29e0
e0ff600602
26587a2c69

Enviando 780
Listando Nos ...
Buscando vizinho ... Addr 26587a29e0 NickName: 4
NickName 1: (RSL -39, Flags: 1, nTX: 11, nRX: 7, nTXFault 0)
NickName 5: (RSL -111, Flags: 0, nTX: 0, nRX: 8, nTXFault 0)
Buscando vizinho ... Addr e0ff600602 NickName: 5
NickName 1: (RSL -100, Flags: 1, nTX: 3007, nRX: 7111, nTXFault 401)
NickName 6: (RSL -98, Flags: 0, nTX: 1629, nRX: 2908, nTXFault 168)
NickName 4: (RSL -94, Flags: 1, nTX: 1795, nRX: 2698, nTXFault 57)
Buscando vizinho ... Addr 26587a2c69 NickName: 6
  
```

Figura 8: Menu do Aplicativo.

De posse dos dados coletados registrados na planilha do Excel, obtém-se a Taxa de Falhas de transmissão, através da razão do número dos pacotes transmitidos que falharam (nTXfault) pelo número de pacotes de dados transmitidos (nTX) para cada transceptor de RF vizinho. A obtenção da Taxa de Falhas de transmissão tem como finalidade realizar um comparativo de desempenho entre os transceptores de RF sem e com diversidade de antena.

4.1 Transceptor de RF sem diversidade de antena

Com os dados coletados, os resultados da Taxa de Falha de transmissão, para os dois transceptores de RF com o algoritmo de diversidade de antena desabilitado 1008 DIV ANT e 1016 DIV ANT, são apresentados na Tabela 1.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Date	Hour	Nickname from	Nickname destination	RSL	Packets transmitted	Packets received	nTXfault	Neighbor	Ciclo	
2	14/03/2018	18:25:32	2		1	-83	6761	13789	1361	1	0
3	14/03/2018	18:25:32	2		6	-66	11	113	0	0	0
4	14/03/2018	18:25:32	2		3	-73	4966	5270	161	1	0
5	14/03/2018	18:25:41	3		1	-51	8285	16689	42	1	0
6	14/03/2018	18:25:41	3		5	-50	480	6813	1	0	0
7	14/03/2018	18:25:41	3		2	-73	680	5653	1	0	0
8	14/03/2018	18:25:51	5		1	-53	6638	8524	34	1	0
9	14/03/2018	18:25:51	5		3	-54	3938	5340	9	1	0
10	14/03/2018	18:25:59	6		1	-61	69	1103	20	1	0
11	14/03/2018	18:25:59	6		4	-7	3	5	0	0	0
12	14/03/2018	18:25:59	6		7	-8	1	6	0	0	0
13	14/03/2018	18:25:59	6		2	-42	26	487	12	1	0
14	14/03/2018	18:26:10	7		1	-55	37	339	5	1	0
15	14/03/2018	18:26:10	7		6	-29	0	25	0	1	0
16	14/03/2018	18:26:22	4		1	-83	39	339	7	1	0
17	14/03/2018	18:26:22	4		6	-88	3	17	0	1	0
18	14/03/2018	18:26:32	2		1	-83	6763	13830	1361	1	0
19	14/03/2018	18:26:32	2		6	-67	12	120	0	0	0
20	14/03/2018	18:26:32	2		3	-73	4967	5290	161	1	0
21	14/03/2018	18:26:41	3		1	-51	8291	16737	42	1	0
22	14/03/2018	18:26:41	3		5	-50	480	6821	1	0	0
23	14/03/2018	18:26:41	3		2	-73	680	5655	1	0	0

Figura 9: Dados registrados na planilha Excel.

Tabela 1: Taxa de falhas TX para o 1008 DIV ANT e 1016 DIV ANT.

Rádio ID	1016 DIV ANT			1008 DIV ANT		
	Packets TX	nTXfault	Falhas TX	Packets TX	nTXfault	Falhas TX
1015	981	113	11,5%			
1022	17	2	12,9%	1219	742	60,9%
1016 DIV ANT				938	174	18,5%
1008 DIV ANT	1417	157	11,1%			

Pela Tabela 1, podemos verificar que o transceptor 1008 DIV ANT é par de transmissões dos vizinhos 1022 e 1016 DIV ANT e o transceptor 1016 DIV ANT é par dos vizinhos 1015, 1022 e 1008 DIV ANT, conforme Figura 10.

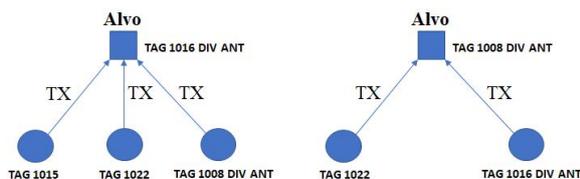


Figura 10: Transceptores 1008 DIV ANT e 1016 DIV ANT pares (alvos) com algoritmo de diversidade de antena desabilitado.

As Figuras 11 e 12 mostram a Taxa de falhas e a taxa média de falhas de transmissão para os transceptores sem diversidade de antena pares.

4.2 Transceptor de RF com diversidade de antena e afastamento entre antenas de 10 cm

Após a etapa de coleta de dados com o algoritmo de diversidade de antena desabilitado no 1008 DIV ANT e 1016 DIV ANT, o algoritmo foi novamente habilitado via *software*, onde o afastamento inicial

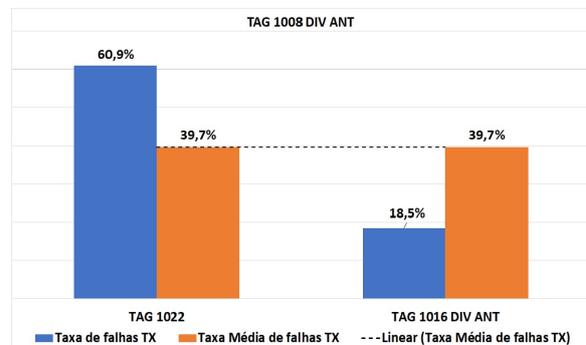


Figura 11: Taxa de Falhas e Taxa Média de Falhas TX para o 1008 DIV ANT.

entre as antenas dos transceptores é de 10 cm, conforme Figura 13.

Após, é realizada uma nova coleta de dados de nTX e nTXfault e calcula-se a Taxa de Falhas de transmissão novamente, conforme mostrado na Tabela 2.

Pela Tabela 2, podemos verificar que o transceptor 1008 DIV ANT é par de transmissões dos vizinhos 1015 e 1016 DIV ANT e o transceptor 1016 DIV ANT é par dos vizinhos 1011 e 1008 DIV ANT, conforme Figura 14.

As Figuras 15 e 16 mostram a Taxa de falhas

Tabela 2: Taxa de Falhas TX para o 1008 DIV ANT e 1016 DIV ANT.

Rádio ID	1016 DIV ANT			1008 DIV ANT		
	Packets TX	nTXfault	Falhas TX	Packets TX	nTXfault	Falhas TX
1011	621	49	7,9%	1118	77	6,8%
1015				1009	48	4,7%
1016 DIV ANT	1262	65	5,2%			
1008 DIV ANT						

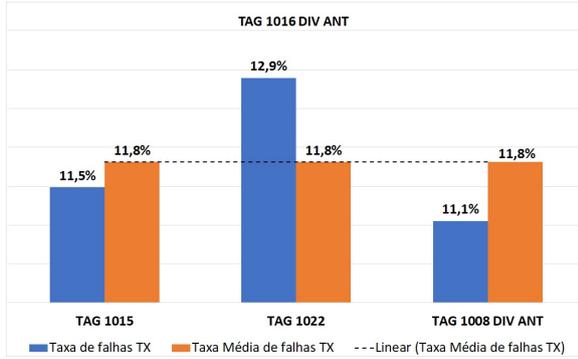


Figura 12: Taxa de Falhas e Taxa Média de Falhas TX para o 1016 DIV ANT.

e a taxa média de falhas de transmissão para os transceptores com diversidade de antena pares.

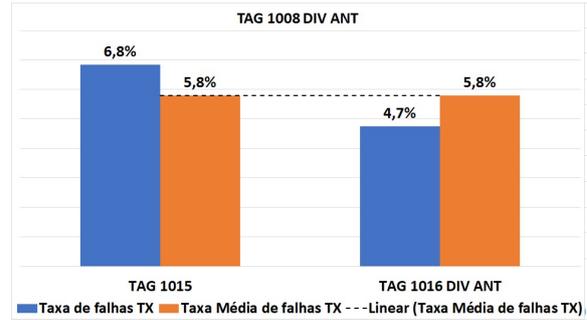


Figura 15: Taxa de Falhas e Taxa Média de Falhas TX para o 1008 DIV ANT.

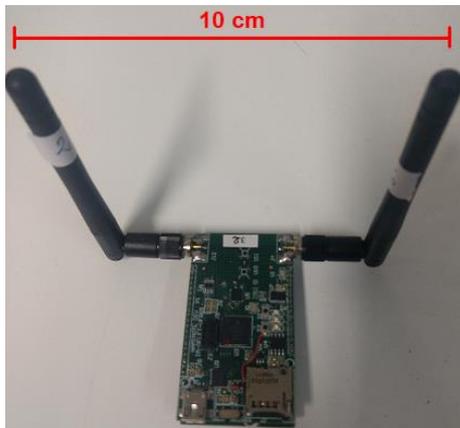


Figura 13: Afastamento entre antenas de 10 cm.

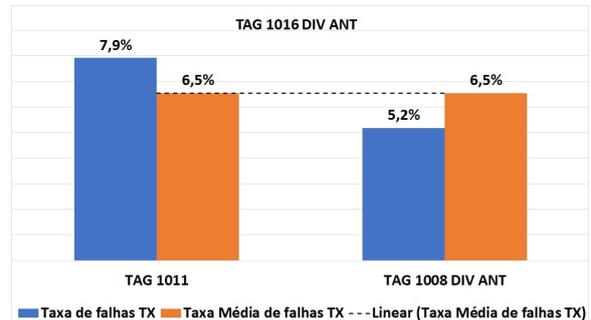


Figura 16: Taxa de Falhas e Taxa Média de Falhas TX para o 1016 DIV ANT.

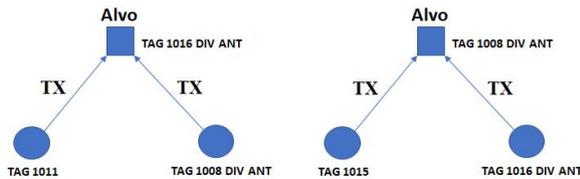


Figura 14: Transceptores 1008 DIV ANT e 1016 DIV ANT pares (alvos) com algoritmo de diversidade de antena habilitado.

4.3 Transceptor de RF com diversidade de antena e afastamento entre antenas de 20 cm

Neste experimento, o afastamento entre as antenas dos transceptores 1008 DIV ANT e 1016 DIV ANT é aumentado para 20 cm, conforme Figura 17.

Após, é realizada uma nova coleta de dados, conforme realizado anteriormente, como mostra a Tabela 3.

Pela tabela 3, podemos verificar que o transceptor 1008 DIV ANT é par de transmissões dos vizinhos 1015 e 1016 DIV ANT e o transceptor 1016 DIV ANT é par dos vizinhos 1011 e 1008 DIV ANT, conforme Figura 18.

As Figuras 19 e 20 mostram a Taxa de falhas e a taxa média de falhas de transmissão para os transceptores com diversidade de antena pares.

Tabela 3: Taxa de Falhas TX para o 1008 DIV ANT e 1016 DIV ANT.

Rádio ID	1016 DIV ANT			1008 DIV ANT		
	Packets TX	nTXfault	Falhas TX	Packets TX	nTXfault	Falhas TX
1011	1071	68	6,4%	3699	303	8,2%
1015				1912		83
1016 DIV ANT	4576	289	6,3%			
1008 DIV ANT						

Tabela 4: Taxa média de falhas de transmissão.

	S/ DIV	C/ DIV 10cm	Redução TX	C/ DIV 20cm	Redução TX
1008 DIV ANT	39,7%	5,8%	33,9%	6,3%	33,4%
1016 DIV ANT	11,8%	6,5%	5,3%	6,35%	5,5%

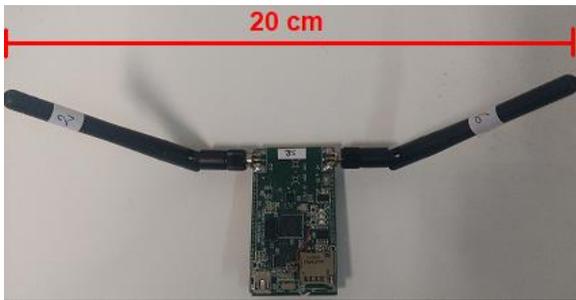


Figura 17: Afastamento entre antenas de 20 cm.

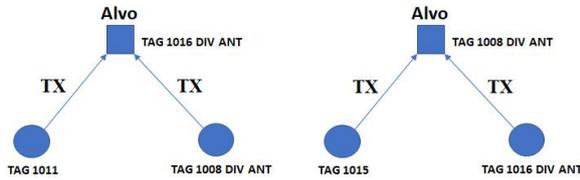


Figura 18: Transceptores 1008 DIV ANT e 1016 DIV ANT pares (alvos) com algoritmo de diversidade de antena habilitado.

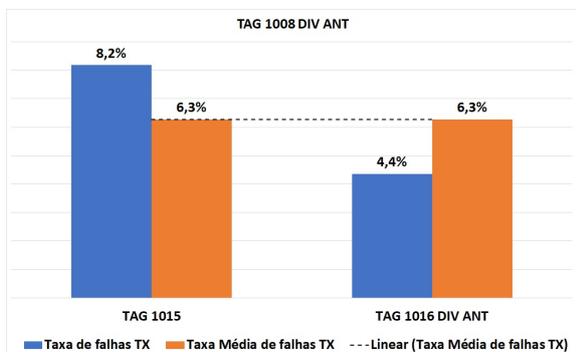


Figura 19: Taxa de Falhas e Taxa Média de Falhas TX para o 1008 DIV ANT.

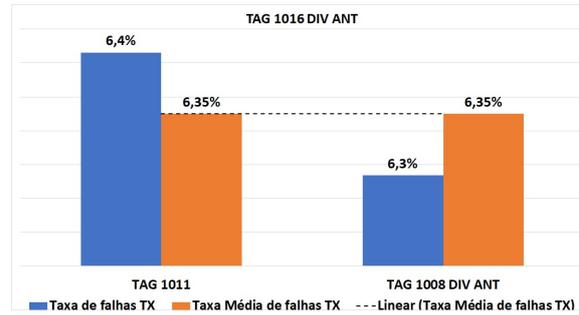


Figura 20: Taxa de Falhas e Taxa Média de Falhas TX para o 1016 DIV ANT.

5 Resultado dos Experimentos

Observa-se primeiramente, que na análise de desempenho dos transceptores sem diversidade, o 1008 DIV ANT apresentou a maior taxa média de falhas na transmissão, em relação ao 1016 DIV ANT. Isso deve-se ao fato (considerando as análises serem um processo estocástico) do transceptor estar geograficamente mais afastado do par de transmissões 1022, também devido a obstáculos (passagem de pessoas) ver Figura 6 e coexistência da rede WH.

Pelos resultados verificou-se também, que os transceptores 1008 DIV ANT e 1016 DIV ANT com o algoritmo de diversidade de antena habilitado apresentaram uma redução considerável na taxa média de falhas na transmissão em relação a eles mesmos quando atuando com algoritmo de diversidade de antena desabilitado. Os resultados apresentaram uma redução na taxa média de falhas na transmissão de 33,9% para o 1008 DIV ANT e 5,3% para o 1016 DIV ANT para o afastamento entre antenas de 10 cm.

Para o afastamento entre antenas de 20 cm nos transceptores com diversidade em relação a eles mesmos quando atuando com algoritmo de diversidade de antena desabilitado. Os resultados apresentaram redução de 33,4% e 5,5% na taxa média de falhas de transmissão para o 1008 DIV

ANT e o 1016 DIV ANT, respectivamente. Um resumo dos resultados podem ser melhor visualizados na Tabela 4.

6 Conclusões

O uso da técnica de diversidade espacial de antena na recepção melhora consideravelmente a confiabilidade das implementações práticas de redes. Isto é conseguido sem aumentar o custo do transceptor de RF de uma conexão de rede, por exemplo, usando uma maior potência de transmissão ou pré-amplificação adicional (LNA) durante a recepção.

No experimento realizado, utilizando a ferramenta de análise de desempenho dos transceptores com diversidade de antena em uma rede real, os resultados mostraram uma redução considerável na taxa média de falhas na transmissão para os transceptores com diversidade, destacando a eficiência da diversidade espacial de antenas na recepção, proporcionando assim, uma redução no PER e consequentemente aumento da confiabilidade a rede. É possível que, esta quantidade de melhoria com a diversidade espacial de antena na recepção possa ser aumentada ainda mais, uma vez que foi pequena a separação espacial entre as antenas, limitando o desempenho. Espera-se que os transceptores de RF com maior separação espacial entre as antenas, possam aumentar ainda mais o ganho de diversidade.

A diversidade da antena proporciona maior benefício quando as condições do sinal estão próximas dos níveis de sensibilidade mínima. Nesse cenário, a diversidade de antena também proporcionará um *link* com maior robustez ao PER. Sob condições de sinal mais fortes, a seleção de qualquer antena oferece um bom desempenho de recepção. Nesse contexto, o desempenho da diversidade de antena é tão bom quanto o desempenho sem diversidade antena.

Referências

- Emerson (2013). Smart Wireless Gateway. Disponível em: <https://www.emerson.com/documents/automation/smart-wireless-gateway-pt-75812.pdf>.
- Freescale (2012). *MC 1322X: Advanced ZigBee - Compliant Soc Platform for the 24 GHz IEEE 802.15.4 Standard Reference Manual*, Rev. 1.6.2012.
- Hart (2009). *HART COMMUNICATION FOUNDATION. HCF SPEC-085, Rev. 1.2*, Rev. 1.2.2009.
- Hart (2010). *Hart Communication Foundation - WirelessHART Device Types Gateways HCF LIT 119*, Rev. 1.0.2010.
- Haykin, S. (2008). *Sistemas Modernos de Comunicações Wireless*, Bookman.
- Lorençato, A., Müller, I., Winter, J., Kunzel, G., Pereira, C. E. and Netto, J. C. (2013). WirelessHART field device with integrated network analyzer, *2013 Symposium on Computing and Automation for Offshore Shipbuilding*, pp. 29–33.
- Machado, T. M. and Pereira, C. E. (2014). *Analisador de redes WirelessHART com capacidade de detecção de coexistência*, Trabalho de Conclusão de Mestrado.
- Rappaport, T. S. (1996). *Wireless Communications - Principles and Practice*, Prentice Hall.
- Winter, J. M., Lima, C., Muller, I., Pereira, C. E. and Netto, J. C. (2011). WirelessHART routing analysis software, *2011 Brazilian Symposium on Computing System Engineering*, pp. 96–98.